同期整流向けの最適な MOSFET の選択

About this document

Scope and purpose

このアプリケーションノートは、インフィニオン OptiMOSTM テクノロジの 30 V、40 V、60 V、75 V、80 V、100 V、120 V、および 150V デバイス向けに、最適化チャートを使用して最適な MOSFET を選択するためことに役立ちます。

Table of contents

About this document 1
Table of contents 1
1 はじめに 2
2 同期整流の基本 3
3 同期整流 MOSFET の最適化 4
4 MOSFET はどの負荷電流で最適化すべきか？ 7
5 4 象限同期整流デバイス最適化チャートを使用した MOSFET の選択 8
改訂履歴 18

1 はじめに

電力変換器のパッケージ密度が継続的に増加し、省エネルギーのガイドラインがますます制限されてきているため、パワーステージの効率は、継続的に改善する必要があります。絶縁型コンバータの 2 次側整流による高いダイオード順方向損失が主な損失を占めるため、この効率レベルは、同期整流 (しばしば「Sync Rec」または「SR」に省略される) にするだけで可能となります。ダイオードを MOSFET に置き換えると、システム効率の最適化とオーバーシュート電圧の制御という新しい課題が発生します。このアプリケーションノートは、インフィニオン OptiMOS™ テクノロジの 30 V、40 V、60 V、75 V、80 V、100 V、120 V、および 150V デバイス向けに、最適化チャートを使用して最適な MOSFET を選択するために寄与します。

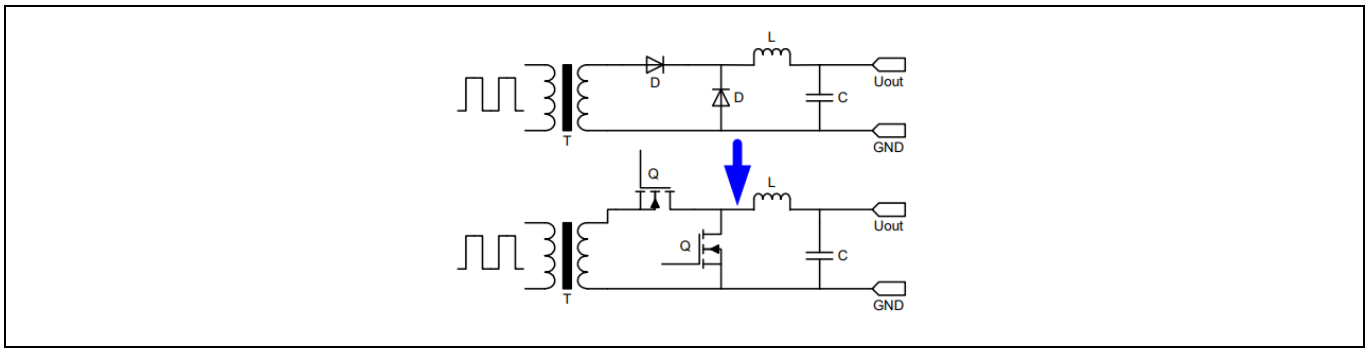


Figure 1 ダイオードと同期整流

2 同期整流の基本

同期整流で最適な MOSFET を選択するには、電力損失のメカニズムを十分に理解する必要があります。はじめに、損失は負荷に依存する導通損失と比較的一定のスイッチング損失の間で区別されなければなりません。導通損失は、MOSFET の $R_{DS(on)}$と、内部ボディダイオード V_{SD} の順方向電圧によって生じます。出力電流が高くなるにつれて、導通損失 ($R_{DS(on)}$損失) は増加します。2 つの同期整流 MOSFET 間の連動を保証し、電流のシュートスルーを回避するためには、一定のデッドタイムが保証される必要があります。したがって、一次側をオンにする前に、別の MOSFET をオフにする必要があります。まさにこの MOSFET がフリーホイール電流全体を導通しているため、この電流は MOSFET チャネルから内部ボディダイオードに転流する必要があり、そこで追加のボディダイオード損失を生じさせます。ボディダイオードのオン時間は約 50ns から 100ns と非常に短いため、システムの出力電圧がボディダイオードの順方向電圧よりも大幅に大きい場合、これらの損失を無視できます。

電力変換器のスイッチング周波数 (f_{SW}) と出力負荷 (I_{OUT}) に応じて、スイッチング損失は MOSFET の総損失に大きな影響を与えます。MOSFET をオンにするためには、ゲート電荷 Q_g が充電される必要があります。そのためゲート電圧 (V_g) が十分な大きさに設定されていることを確認する必要があります。MOSFET をオフにすると、ゲート電荷はソースに放電されます。これは、ゲート抵抗およびドライバにおける Q_g の放出を意味します。これらのゲート駆動損失は、ダイサイズが大きいほど Q_g が大きくなるため、特定のテクノロジの低オン抵抗 MOSFET の方が高オン抵抗 MOSFET よりも高くなります。

トータルスイッチング損失のもう 1 つの重要な点は、出力容量 C_{oss} と MOSFET の逆回復電荷 Q_{rr} に関連します。ターンオフの瞬間を考慮して、Q_{rr} の電荷を除去し、出力容量を 2 次側トランス電圧 (V_T) まで充電する必要があります。このプロセスにより、転流ループがインダクタンスに結合し、逆電流ピークが発生します。逆電流のピーク値が発生し、この電流値が転流ループのインダクタンスと結合します。したがって、このエネルギーは、MOSFET の出力キャパシタンスに移動され、電圧スパイクがあらかじめ蓄積されたエネルギー移動することで電圧スパイクが起こります。このエネルギーは、PCB のインダクタンスと MOSFET の出力容量 C_{oss} によって定義される LC 発振回路起因となります。発振は、回路の寄生直列抵抗によって減衰されます。この誘導性ターンオフエネルギーは、MOSFET C_{oss} (それぞれ、2 次側トランス電圧まで充電されたときの出力電荷 Q_{oss}) に直接依存するため、合成 C_{oss} が容量性ターンオフ損失を定義します。ゲート電荷で起こることと同様に、Q_{oss} は低オン抵抗のデバイスで増加します。したがって、最大効率を達成する導通損失とスイッチング損失のバランスを見つけることは常に可能です。

最初の概算として、Q_{rr} は OptiMOS™製品では無視できます。これは、Q_{rr} が総電力損失にわずかに寄与するだけだからです。この場合、Q_{rr} は MOSFET ボディダイオードの逆回復電荷のみと見なされます。 一方、データシートの Q_{rr} は、JEDEC 規格を確認して測定されるため、ボディダイオードの Q_{rr} だけでなく、MOSFET の出力電荷の一部も含まれます。そのため、データシートの Q_{rr} 値と比較して、アプリケーションの実際の Q_{rr} 値は低い値となります。データシートの値は、最大許容 MOSFET ドレイン電流を適用して測定され、ボディダイオードは 500µs までの非常に長い時間導通し、di/dt は 100A/µs の値に固定されます。実際のアプリケーションを考慮すると、最大ドレイン電流の約 3 分の 1 以下の電流が最も一般的に見られます。 ボディダイオードの導通時間は 20ns から 100ns の範囲であり、di/dt は 800A/µs の値に達する可能性があります。

3 同期整流 MOSFET の最適化

効率に関して同期整流 MOSFET を最適化するためには、スイッチング損失と導通損失のバランスの取れた比率を見つける必要があります。軽負荷状態で考慮すると、$R_{DS(on)}$の導通損失はわずかな役割しか果たしません。この場合、全負荷範囲にわたってほぼ一定であるスイッチング損失が支配的です。高い出力電流の場合では、導通損失が最大の比率であるため、総電力損失に最も影響を与えます。**Figure 2** を参照してください。

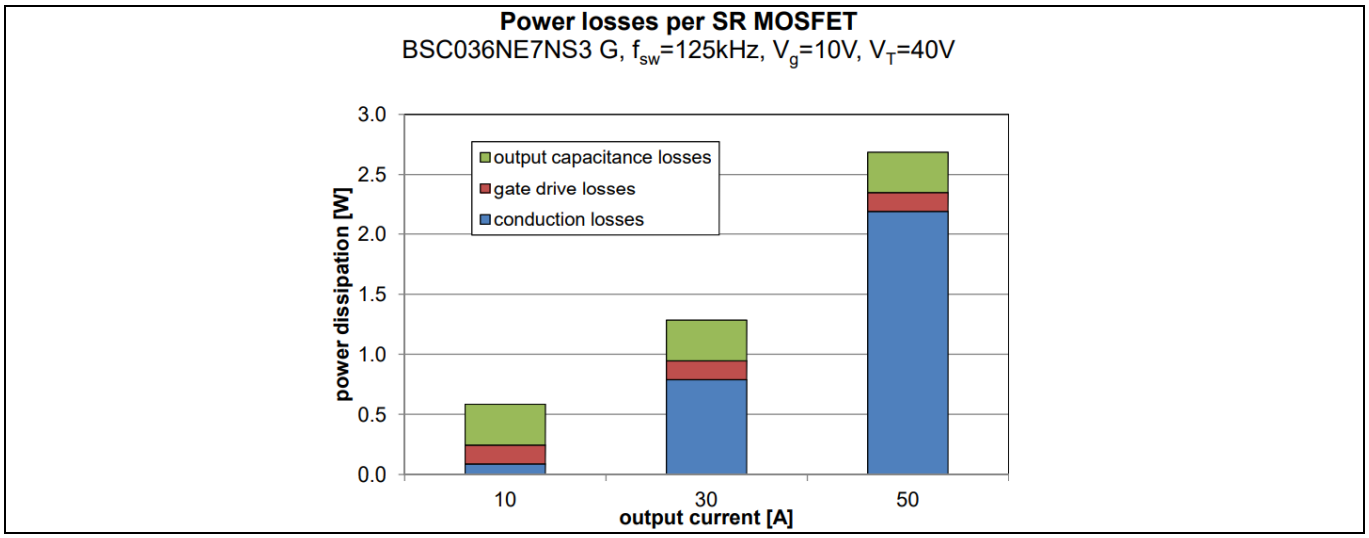


Figure 2 電力損失の内訳と出力電流

最適な MOSFET を選択するには、$R_{DS(on)}$クラスに特に注意を払う必要があります。例として、**Figure 3** に示すように、特定の条件下で 60V OptiMOS™ ファミリを使用できます。最適点を超えると、$R_{DS(on)}$での総電力損失が直線的に増加します。ただし、この例のとおり $R_{DS(on)}$を 0.5mΩ 未満に下げると、出力容量が急速に増加するため、損失が劇的に増加します。さらに、**Figure 3** では、最小電力損失の範囲が非常に広いことがわかります。この例では、総損失は 0.75mΩ と 2.8mΩ の間でほぼ同じままです。これは、BSC016N06NS と BSC028N06NS の両方が適していることを意味します。また、実際には、損失はより広い範囲 (0.55mΩ から 3.9mΩ) で 1W 未満であるため、BSC039N06NS も選択できます。ただし、BSC039N06NS は、電流が小さいアプリケーションやスイッチング周波数が高いアプリケーションでパフォーマンスが向上します。

同期整流 MOSFET の最適化

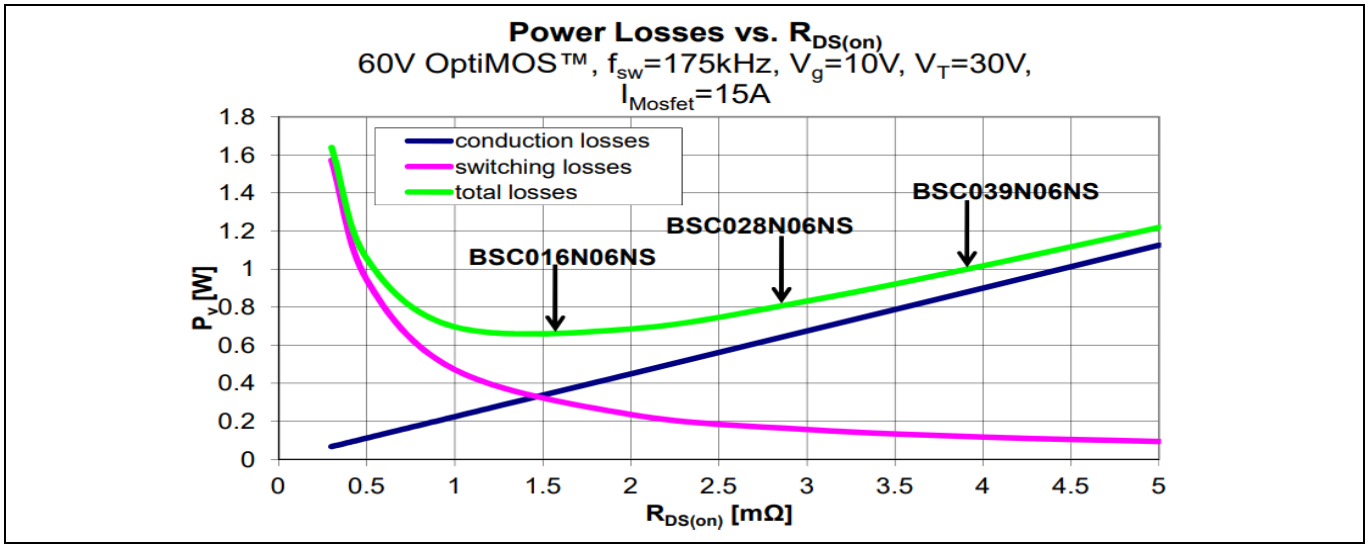


Figure 3　電力損失と $R_{DS(on)}$

いずれにせよ、**Figure 3** のようなグラフが特定の条件下でプロットされていることを決して忘れてはなりません。実際には、**Figure 4** に示されるように、各 MOSFET を流れる電流 (4a および 4b を参照) またはスイッチング周波数 (4c および 4d を参照) を変化させると、状況は大きく変化します。

I_{Mosfet} を 5A に減少した (f_{SW} は 175kHz のまま) **Figure 4**a の例では、スイッチング損失が全体の損失の大きな割合を占めるようになるため、BSC039N06NS を選択することが有利となります。一方、**Figure 4**c のようにスイッチング周波数を 100kHz (I_{Mosfet} は 15A のまま) に下げると、BSC016N06NS のように導通損失が少ない部品は、はるかに優れた性能を発揮します。

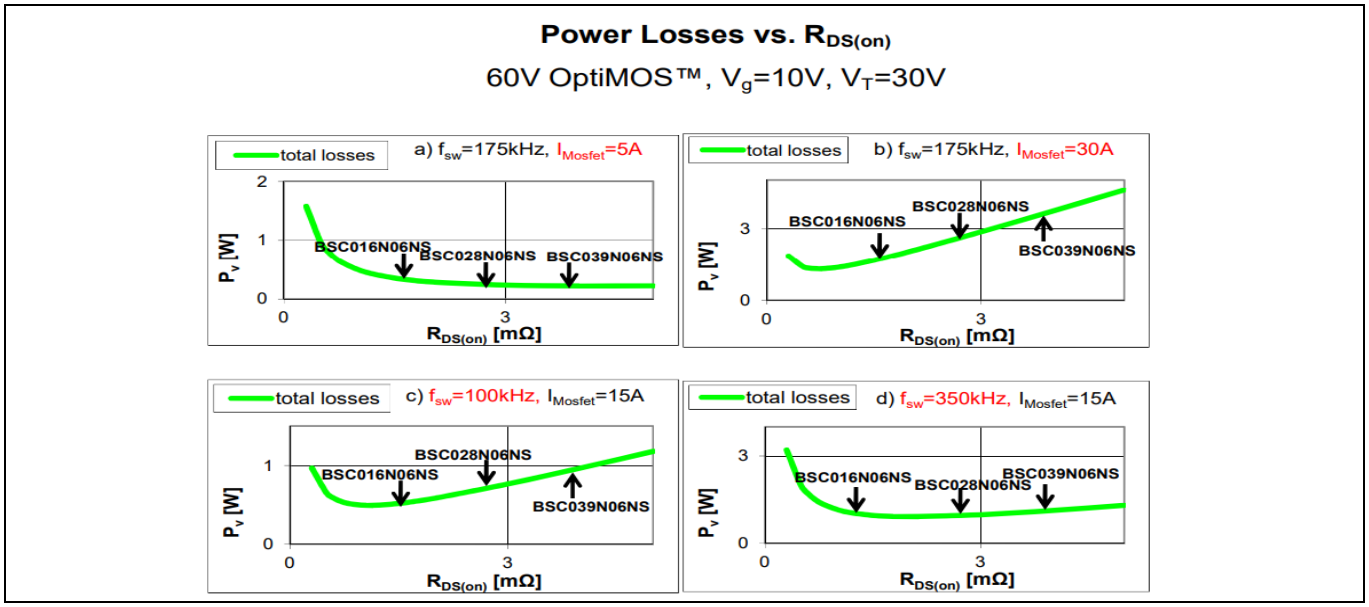


Figure 4　異なる f_{SW} および I_{Mosfet} での電力損失と $R_{DS(ON)}$

同期整流を最適化するために、さらに重要な問題は、MOSFET パッケージの正しい選択です。実際に TO-220 パッケージを SuperSO8 に交換するだけで、効率を向上させられます。この理由は、SuperSO8 パッケージの場合、合成 $R_{DS(on)}$に対するパッケージの寄与度が減少するためです。出力容量を同じに保ちながら $R_{DS(on)}$を減らすと、FOM_{Qoss} が減ります。これは、特定の MOSFET テクノロジのパフォーマンスイ

同期整流 MOSFET の最適化

ンジケータです ($FOM_{Qoss} = R_{DS(on)} * Q_{OSS}$)。この FOM_{Qoss} を減少させることによって、スイッチング損失が減り、効率が向上します。

4 MOSFET はどの負荷電流で最適化すべきか？

全負荷範囲でバランスの取れた効率を実現するには、4 象限同期整流デバイス最適化チャートで MOSFET 電流を適切に選択する必要があります。全負荷の最適化を行うと、高出力電流で良好な効率の結果が得られます。しかし、このアプローチでは、低負荷での効率が劇的に低下し、並列 MOSFET の数が許容できない値に増加します。したがって、出力電流の全範囲にわたって比較的一定の効率値を達成するために、最適値を見つける必要があります。

この問題を説明するために、異なる最適化アプローチを使用した効率曲線を **Figure 5** に示します。これらの効率チャートは、出力電圧 (V_{OUT}) が 12V、変圧器電圧が 24 V、ゲート駆動電圧が 10 V、およびスイッチング周波数が 200kHz の同期整流段の計算上の効率を示します。40 V の最適化チャートで BSC010N04LS の計算結果を取得し、MOSFET 電流 20A に対する設計プロセスを実行すると、MOSFET のシングル使用が最適になります。**Figure 5** に示すように、低電流では高効率が得られますが、高電流では効率が低下します。MOSFET 電流 40 A で最適化を行うと、MOSFET の最適数は 2 になります。この場合、低電流での効率は低下しますが、高負荷で最大になります。通常、バランスの取れた効率は、最大出力電力の 20%から 30%の条件に対して MOSFET を最適化することで実現できます。軽負荷効率に重点を置いたシステムでは、最大電流の 10%から 20%の低電流を計算条件として使用でき、高負荷設計では、最大電流の 60%以内での最適化が適している場合があります。出力負荷の 100%での最適化は、低負荷領域での効率が低く、並列 MOSFET の数が大幅に増加するため、避ける必要があります。

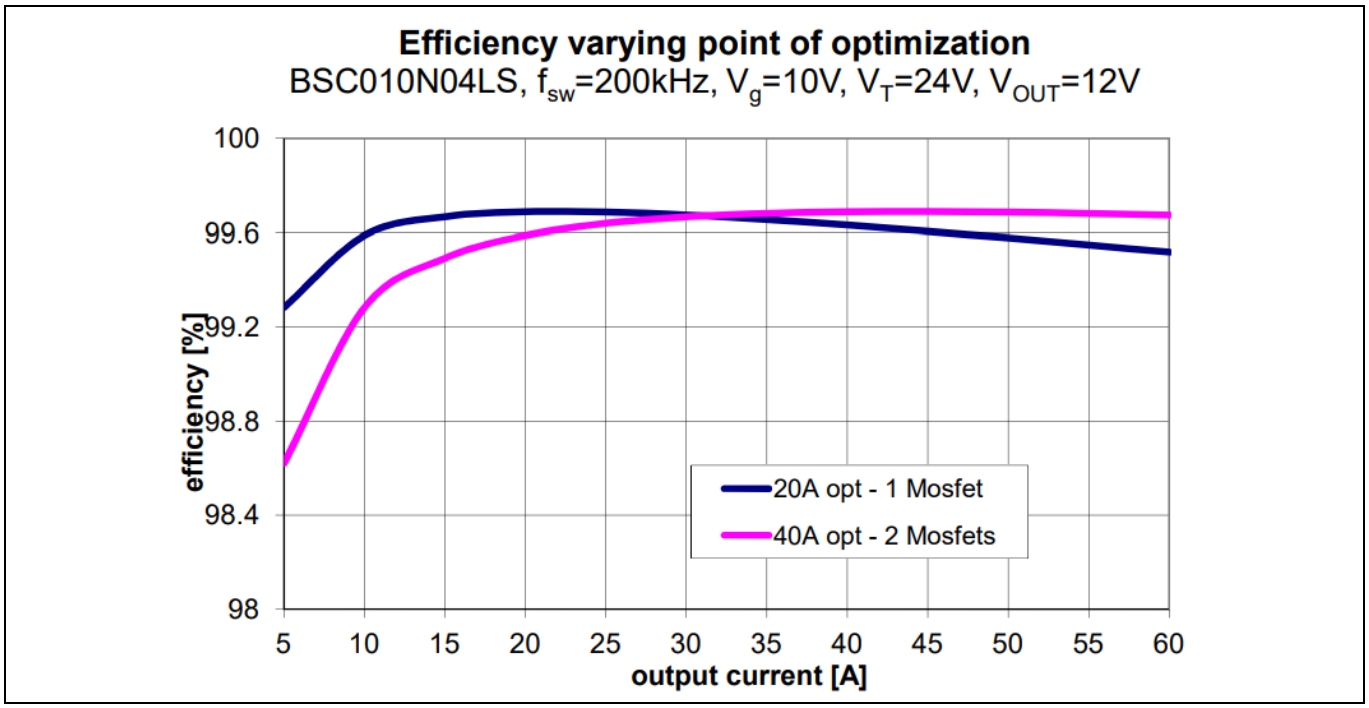


Figure 5 最適化の効率変動ポイント

5 4 象限同期整流デバイス最適化チャートを使用した MOSFET の選択

同期整流アプリケーションで最適な MOSFET を簡単に選択するために、4 象限の同期整流デバイスの最適化チャートを紹介します。このチャートでは、2 次側トランス電圧、スイッチング周波数、および MOSFET 電流の RMS 値 (実効値) の 3 つのアプリケーションパラメータを使用して、最適な製品を見つけられます。理解を容易にするために、実際の例を **Figure 6** に示します。

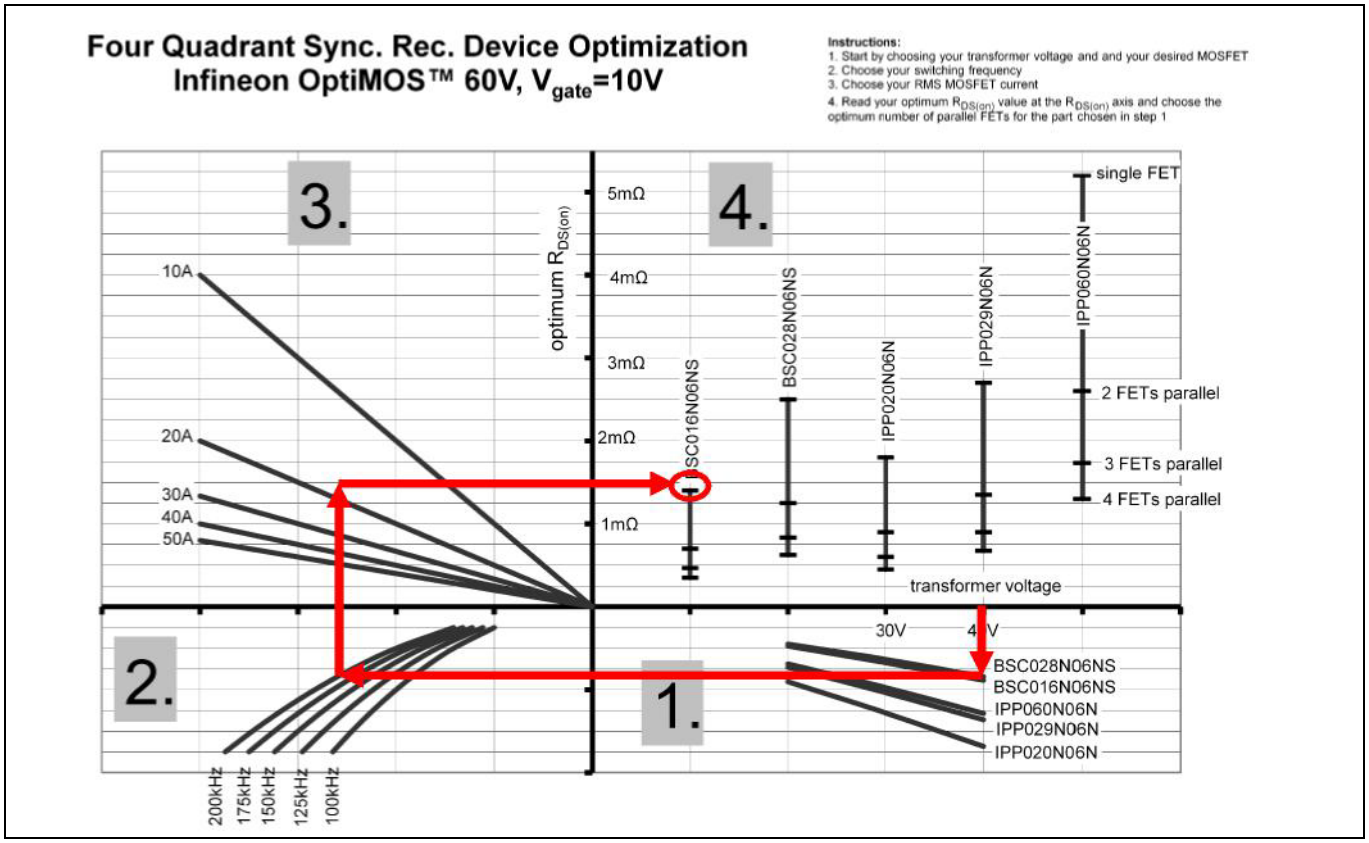


Figure 6 4 象限同期整流デバイス最適化チャート

最適化チャートの開始点は、2 次側のトランス電圧です。垂直線を引くことにより、使用する電圧で、2 本の線の交点で特定の MOSFET を選択できます。水平線とさらに垂直線を使用して、スイッチング周波数と MOSFET 電流を選択できます。前に説明したように、電流レベルの適切な開始点は、最大負荷の 20%～30%です。ここで、最適な $R_{DS(on)}$は、＋Y 軸から読むことができます。また、フィールド番号 4 を調べることにより、並列 MOSFET の最適な数を確認できます。この 4 番目のフィールドでは、前もって 1 番目のフィールドで選択された MOSFET が結果として得られることが重要です。もし、この手順を同じパラメータ (トランス電圧、スイッチング周波数、電流 RMS 値) で繰り返し、別の MOSFET で使用すると、結果として最小の最適な $R_{DS(on)}$が得られ、電力損失が最小になることで効率が向上します。

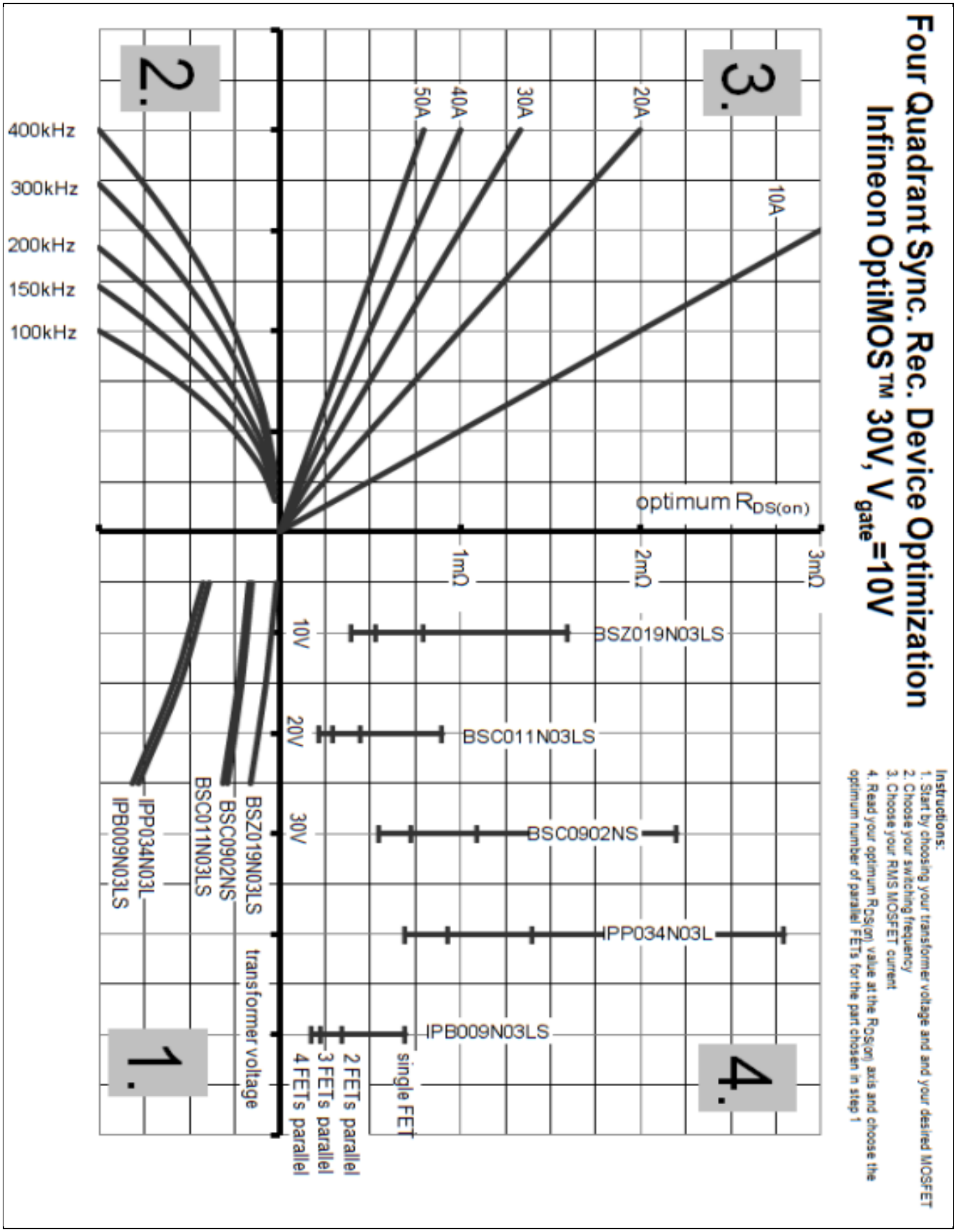
この MOSFET 選択ルーチンは、最適なスイッチング動作を備えたアプリケーション用に計算されます。動的ターンオンやアバランシェなどの 2 次効果が発生する場合、このチャートは不正確である可能性があります。 さらに、ハードスイッチコンバータトポロジで最良の結果が得られます。共振形ソフトスイッチングトポロジは、スイッチングエネルギーの一部が回復する可能性があるため、計算結果の不一致につながる可能性があります。この場合、最適な $R_{DS(on)}$クラスは計算よりも低くなります。1 次側の準共振トポロジに注意してください (例: 位相シフト ZVS フルブリッジ) は、2 次側同期整流器でもハードスイッチング動作を示す可能性があるため、これらの設計チャートを使用して最適化できます。

4 象限同期整流デバイス最適化チャートを使用した MOSFET の選択

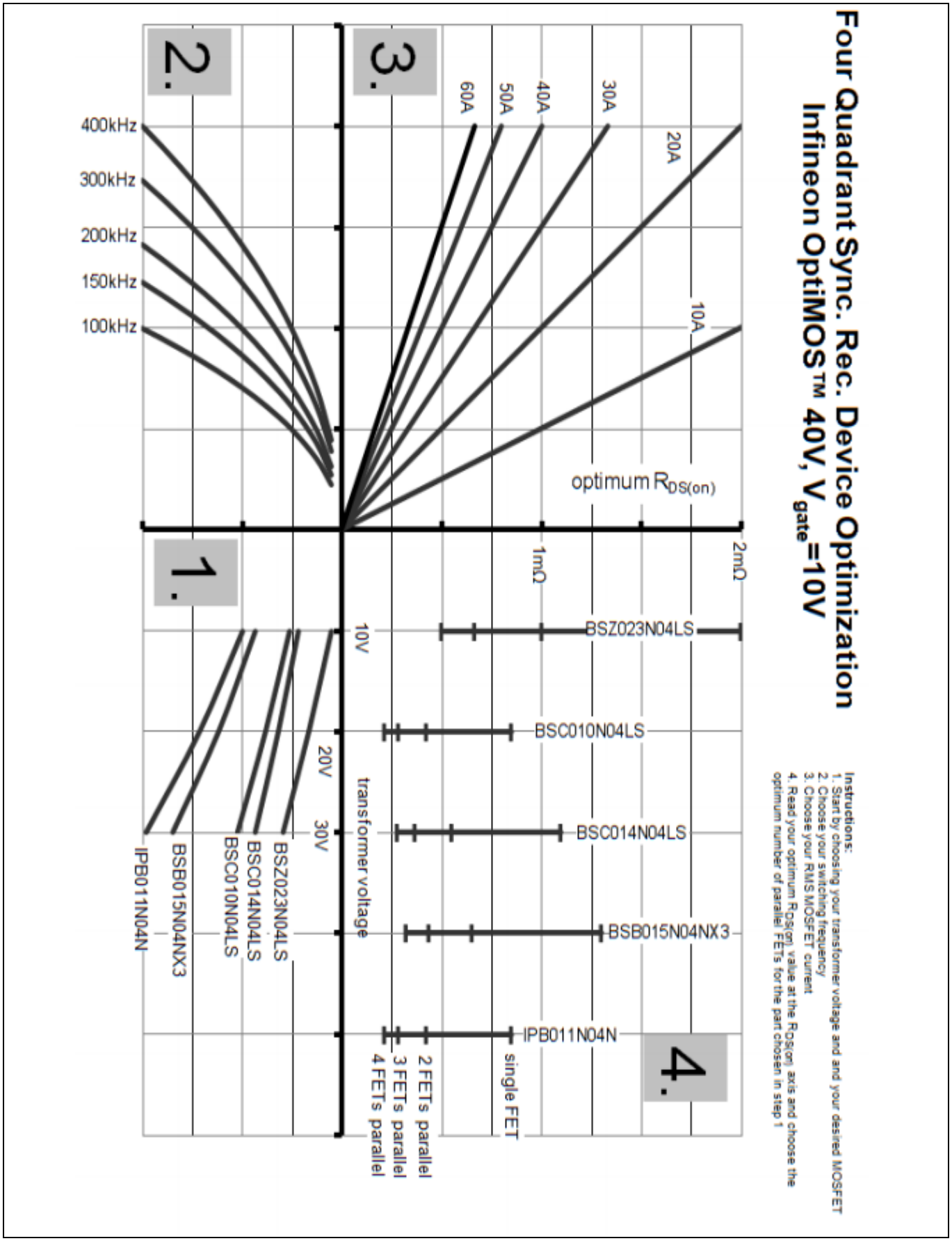
この最適化チャートから得られるすべての結果は、理想的な MOSFET の動作に基づきます。経験的には、実際のアプリケーションでは、理想的な計算と比較して結果が異なる場合があります。したがって、これらの結果は、可能な限り最良のデバイス選択の指標として、また MOSFET の過小/過大化の防止として考慮する必要があります。チャートの結果が 2 つの異なる数の並列 MOSFET の間にある場合、少ない並列数の値は低負荷領域に対して最適化され、多い並列数の値は高電力領域において優れています。さらに、同期整流器と並列接続されたスナバネットワークはデバイスの選択に影響を与える可能性があるため、考慮する必要があります。

全負荷範囲にわたる最適化を 1 回の計算で行うことはできません。MOSFET が計算される特定の負荷ポイント (電流レベル) を取得する必要があります。最適化の範囲を拡大するには、さまざまな負荷電流に対して 4 象限図で複数のテストを実行し、その結果をアプリケーションに対する要求の参考とする必要があります。

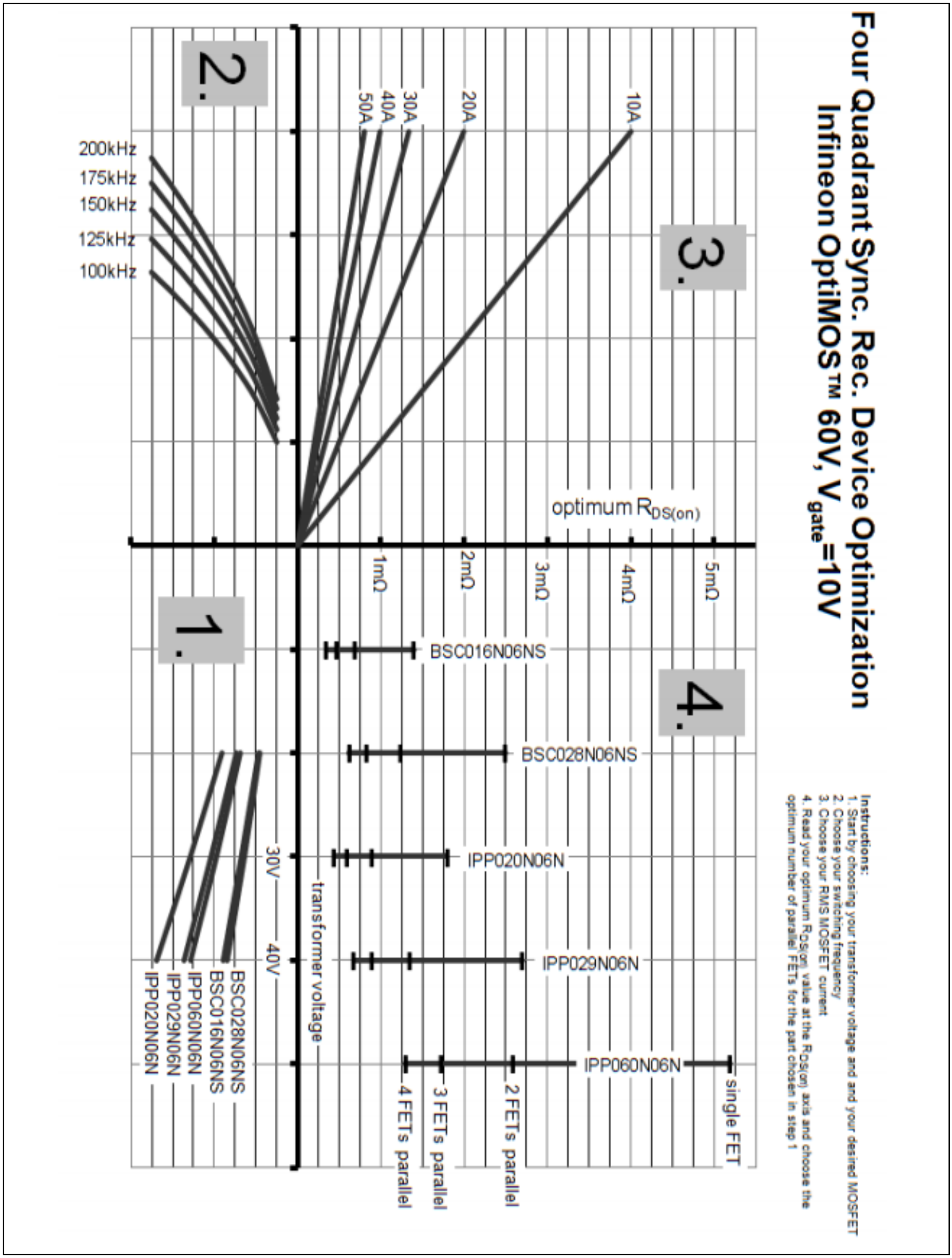
4 象限同期整流デバイス最適化チャートを使用した MOSFET の選択



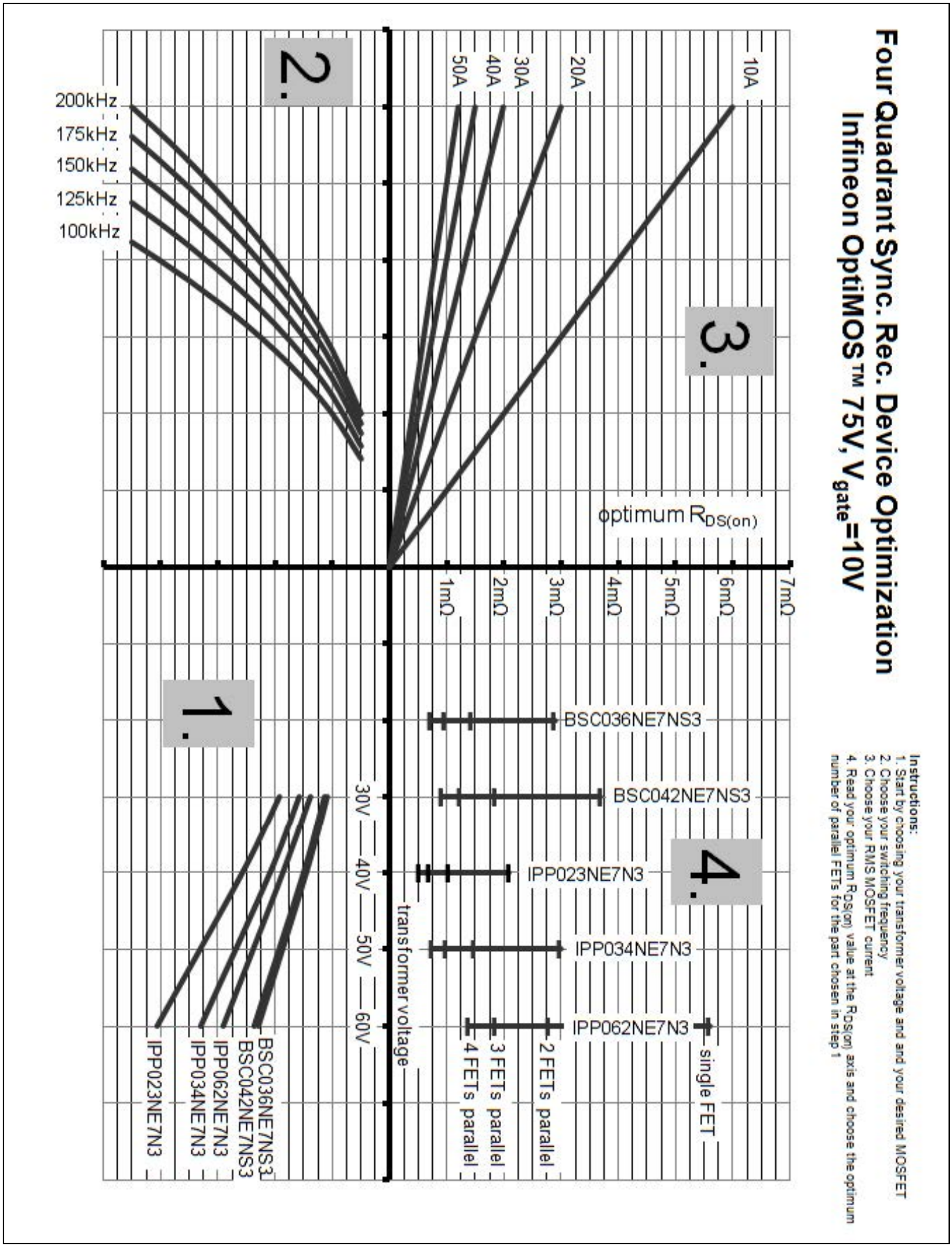
4 象限同期整流デバイス最適化チャートを使用した MOSFET の選択



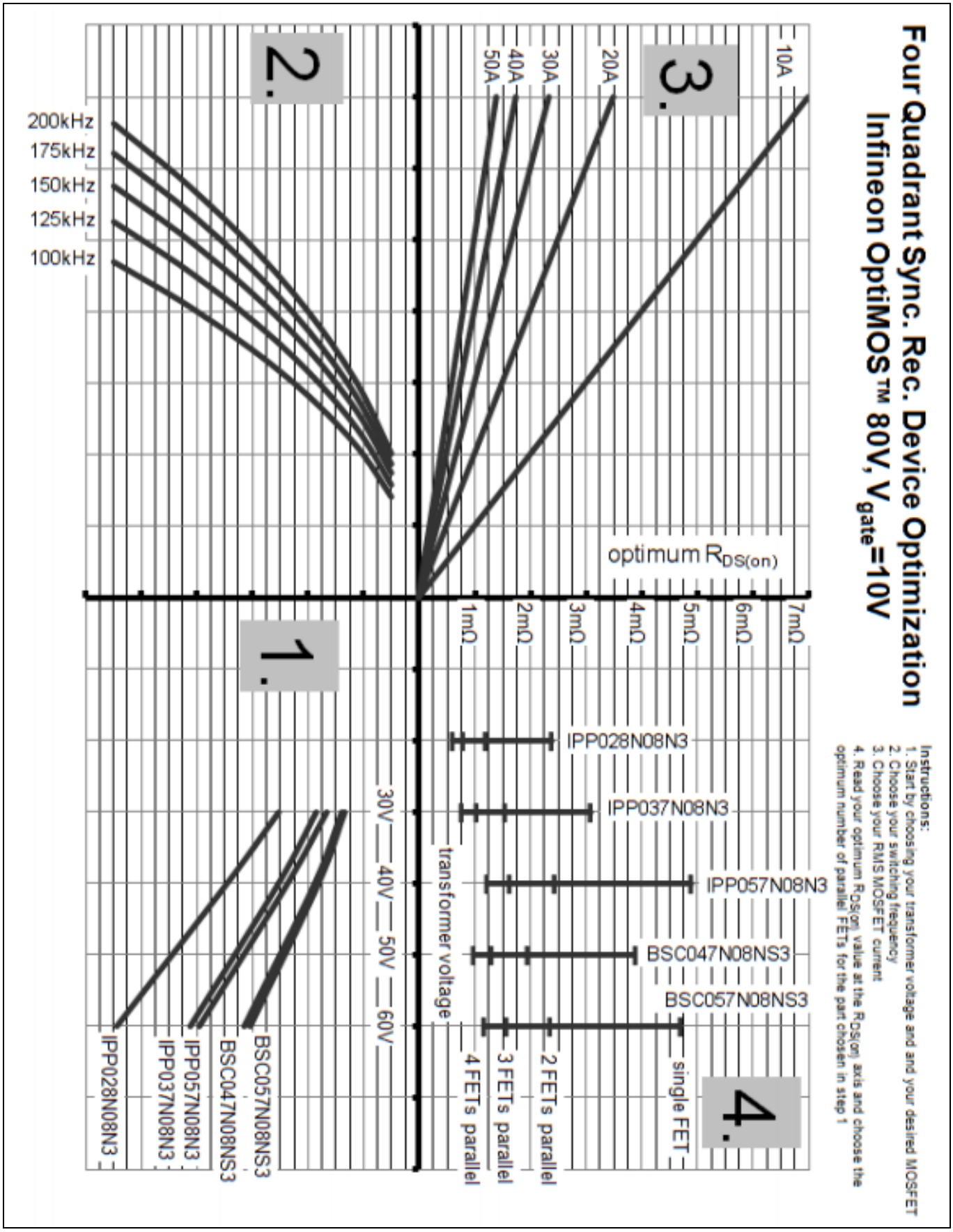
4 象限同期整流デバイス最適化チャートを使用した MOSFET の選択



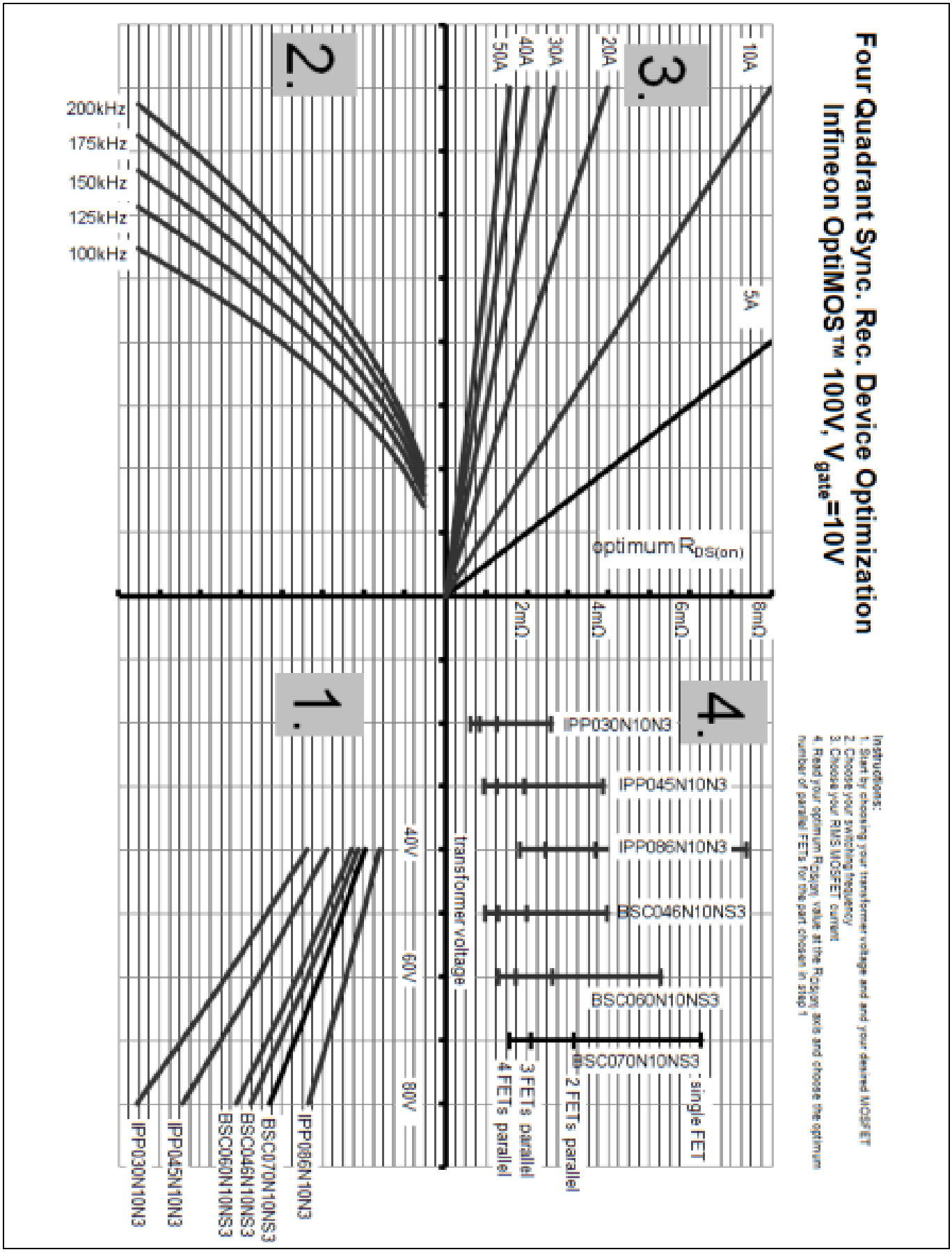
4 象限同期整流デバイス最適化チャートを使用した MOSFET の選択



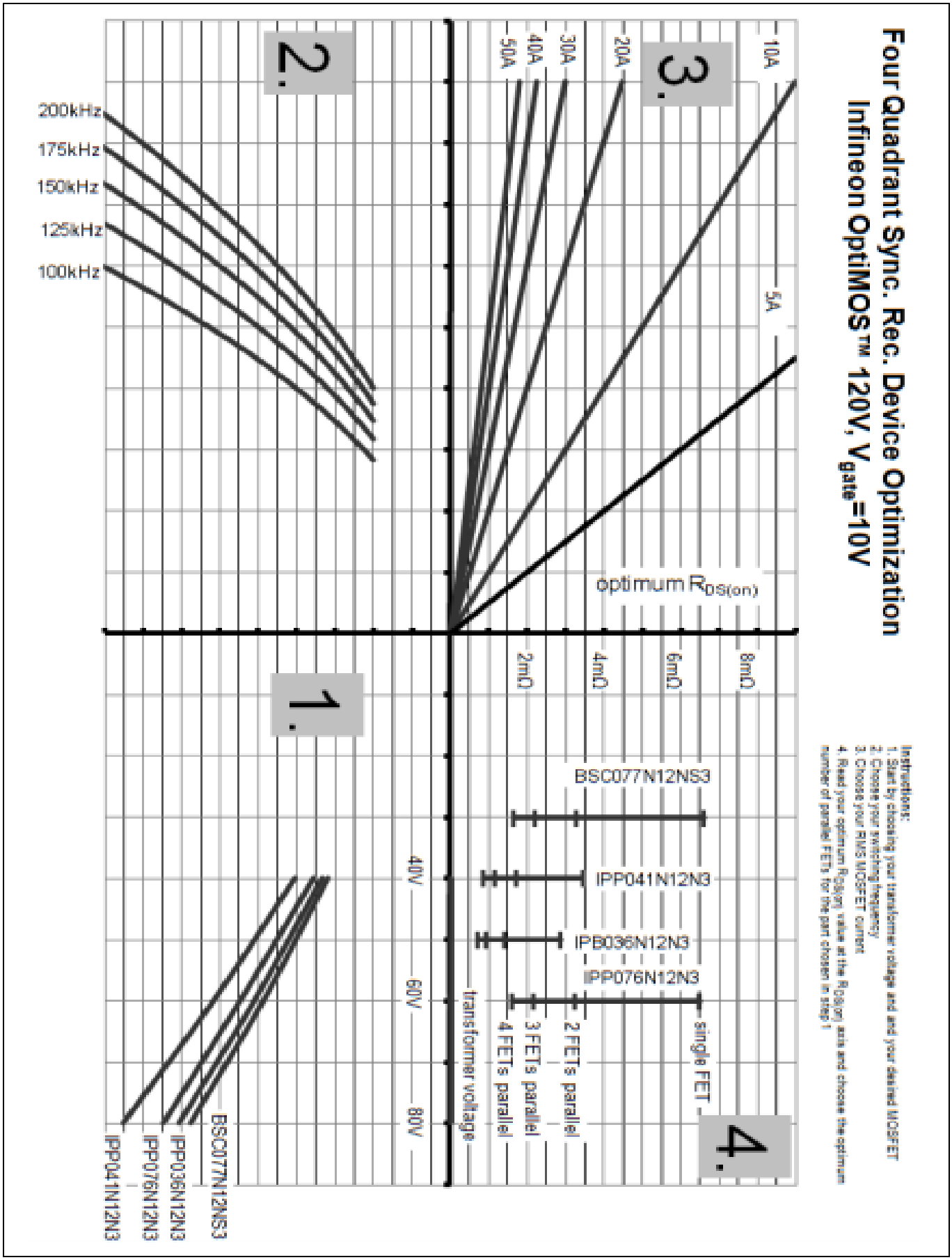
4 象限同期整流デバイス最適化チャートを使用した MOSFET の選択



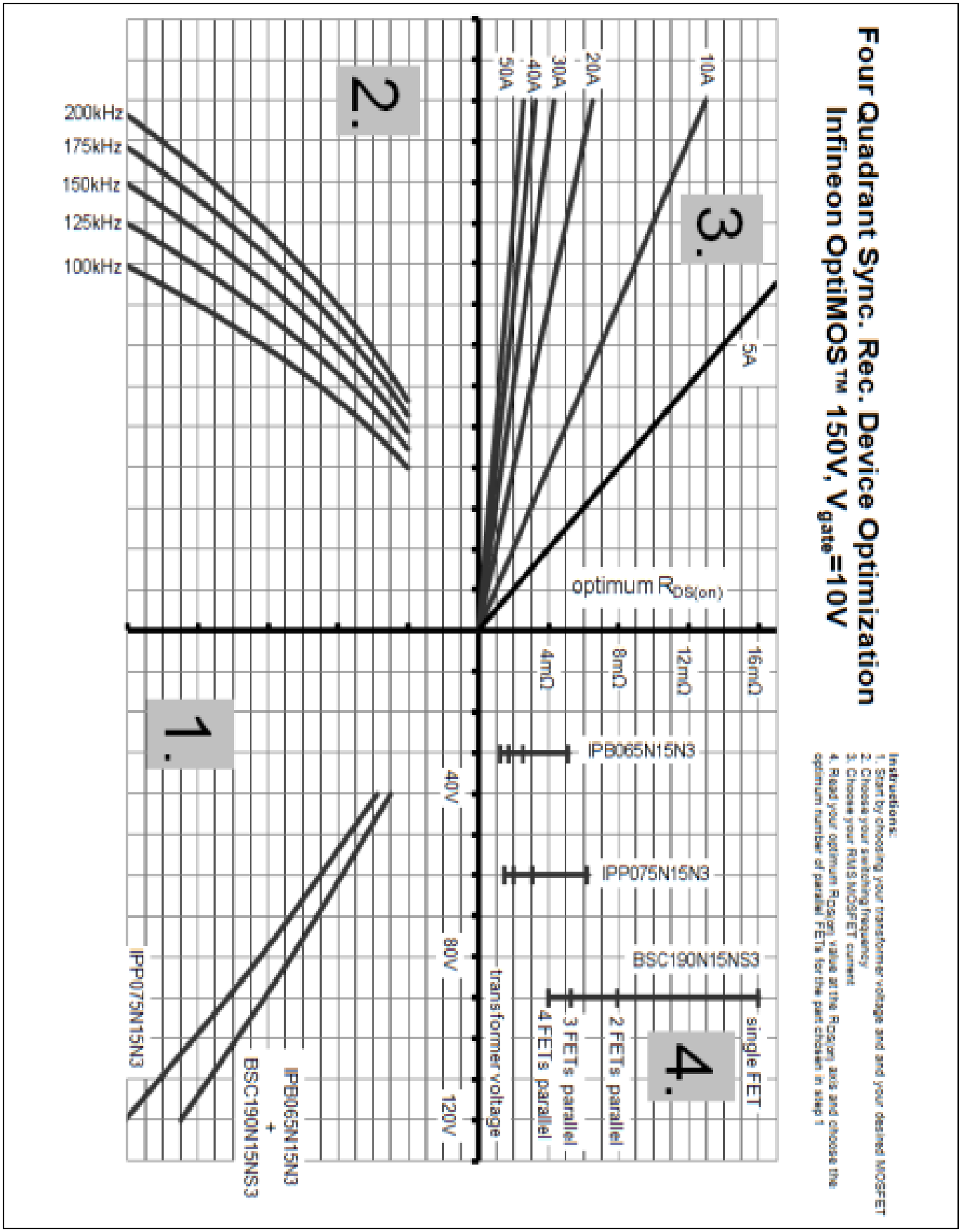
4 象限同期整流デバイス最適化チャートを使用した MOSFET の選択



4 象限同期整流デバイス最適化チャートを使用した MOSFET の選択



4 象限同期整流デバイス最適化チャートを使用した MOSFET の選択



改訂履歴

Document version	Date of release	Description of changes
2.4	2021-08-03	本版は英語版 Application Note AN 2012-05 V2.4 May 2012, Optimum MOSFET Selection for Synchronous Rectification について、CYPRESS DEVELOPER COMMUNITY の参画者によって日本語に翻訳されたドキュメントです。

Trademarks
All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

Edition 2021-08-03
Published by
Infineon Technologies AG
81726 Munich, Germany

© 2021 Infineon Technologies AG.
All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?
Go to erratum@infineon.com

Document reference
Application Note AN2012-05_JA

重要事項
本文書に記載された情報は、いかなる場合も、条件または特性の保証とみなされるものではありません（「品質の保証」）。本文に記された一切の事例、手引き、もしくは一般的価値、および／または本製品の用途に関する一切の情報に関し、インフィニオンテクノロジーズ（以下、「インフィニオン」）はここに、第三者の知的所有権の不侵害の保証を含むがこれに限らず、あらゆる種類の一切の保証および責任を否定いたします。

さらに、本文書に記載された一切の情報は、お客様の用途におけるお客様の製品およびインフィニオン製品の一切の使用に関し、本文書に記載された義務ならびに一切の関連する法的要件、規範、および基準をお客様が遵守することを条件としています。

本文書に含まれるデータは、技術的訓練を受けた従業員のみを対象としています。本製品の対象用途への適合性、およびこれら用途に関連して本文書に記載された製品情報の完全性についての評価は、お客様の技術部門の責任にて実施してください。

本製品、技術、納品条件、および価格についての詳しい情報は、インフィニオンの最寄りの営業所までお問い合わせください（**www.infineon.com**）。

警告事項
技術的要件に伴い、製品には危険物質が含まれる可能性があります。当該種別の詳細については、インフィニオンの最寄りの営業所までお問い合わせください。

インフィニオンの正式代表者が署名した書面を通じ、インフィニオンによる明示の承認が存在する場合を除き、インフィニオンの製品は、当該製品の障害またはその使用に関する一切の結果が、合理的に人的傷害を招く恐れのある一切の用途に使用することはできないこと予めご了承ください。